

Рекурентни уравнения

Тодор Дуков

Защо са ни рекурентни уравнения?

Те се появяват по естествен път, когато искаме да анализираме сложността на рекурсивни алгоритми. Нека вземем за пример алгоритъма за двоично търсене:

```
1 int binary_search(int *arr, int left, int right, int val)
2 {
3     if (left > right)
4         return -1;
5
6     int mid = left + (right - left) / 2;
7
8     if (arr[mid] == val)
9         return mid;
10    else if (arr[mid] < val)
11        return binary_search(arr, mid + 1, right, val);
12    return binary_search(arr, left, mid - 1, val);
13 }
```

При подаден масив `arr` с размер `n` и стойност `val`, функцията `binary_search(arr, 0, n - 1, val)` ще върне индекс на `arr`, в който се намира `val`, ако има такъв, иначе ще върне `-1`. Нека помислим каква е сложността на алгоритъма. Управляващите параметри на рекурсията са `left` и `right`. Всеки път разликата между двете намалява двойно (като накрая когато `left = right` тя ще стане отрицателна). Това означава, че в най-лошият случай сложността на алгоритъма може да се опише със следното рекурентно уравнение:

$$T(0) = 1$$

$$T(n+1) = T(\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor) + 1$$

Добавянето на 1 е заради константните проверки, които се извършват преди рекурсивното извикване. Технически не трябва да е 1, защото проверките са няколко, но това няма да повлияе на асимптотичното поведение на $T(n)$. В този случай лесно се вижда асимптотиката на $T(n)$:

$$T(n) = T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 1 = T(\lfloor \frac{n}{4} \rfloor) + 1 + 1 = T(\lfloor \frac{n}{8} \rfloor) + 1 + 1 + 1 = \dots = T(0) + \underbrace{1 + \dots + 1}_{\text{около } \log(n) \text{ пъти}} \asymp \log(n)$$

Така получаваме, че алгоритъмът има сложност $O(\log(n))$. Обаче в общият случай далеч не е толкова лесно да се намери асимптотичното поведение на дадено рекурентно уравнение. Целта ни ще бъде да развием по-богат апарат за асимптотичен анализ на рекурентните уравнения.

Начини за намиране на асимптотиката на рекурентни уравнения

Начините се разделят на два типа:

1. със решаване на уравнението
2. без решаване на уравнението

И двата начина са ценни. Първият начин ни дава формула във явен вид, което може да ни е от полза. Понякога обаче формулата във явен вид не е “красива”, или изобщо не може да се намери такава. Тогава идва на помощ вторият начин. Той директно ни дава някаква “хубава” формула, без да трябва да намираме в явен вид решение на рекурентното уравнение. Проблемата е обаче, че асимптотиката понякога е малко лъжлива – алгоритъм със сложност $2^{2^{1000}}$ е асимптотично по-бавен от алгоритъм със сложност n , но практически вторият е по-бърз.

Ще разгледаме следните методи (повечето от които са разглеждани по дискретна математика):

- налучкване и доказване
- развиване (което преди малко показахме)
- методът с характеристичното уравнение
- Master теоремата

Нека разгледаме един пример с налучкване:

$$T(0) = 3$$

$$T(n+1) = (n+1)T(n) - n$$

Започваме да разписваме:

| n | $T(n)$ | $n!$ |
|-----|--------|------|
| 0 | 3 | 1 |
| 1 | 3 | 1 |
| 2 | 5 | 2 |
| 3 | 13 | 6 |
| 4 | 49 | 24 |
| 5 | 241 | 120 |
| 6 | 1441 | 720 |

Вече лесно можем да покажем с индукция, че $T(n) = 2(n!) + 1$:

- $T(0) = 3 = 2 \cdot 1 + 1 = 2 \cdot 0! + 1$
- $T(n+1) = (n+1)T(n) - n \stackrel{(\text{ИП})}{=} (n+1)(2(n!) + 1) - n = (n+1)(2(n!)) + n + 1 - n = 2(n+1)! + 1$

Накрая получаваме, че $T(n) \asymp n!$

Нека сега да видим как можем да използваме метода на характеристичното уравнение:

$$T(n) = 1 + \sum_{i=0}^{n-1} T(i) \quad // \text{ функцията е добре дефинирана и за } 0$$

Рекурентното уравнение, зададено в този вид, не може да се реши с този метод. За това ще трябва да направим преобразувания:

$$T(0) = 0$$

$$T(n+1) = 1 + \sum_{i=0}^n T(i) = 1 + T(n) + \underbrace{\sum_{i=0}^{n-1} T(i)}_{T(n)} = 2T(n) + 1 = \underbrace{2T(n)}_{\text{хомогенна част}} + \underbrace{1 \cdot 1^{n+1}}_{\text{нехомогенна част}}$$

От хомогенната получаваме характеристичното уравнение $x - 2 = 0$ с единствен корен 2, а от нехомогенната част получаваме единствен корен 1. Така:

$$T(n) = A \cdot 2^n + B \cdot 1^n \text{ за някои константи } A, B$$

Вече няма нужда и да се намират константите – ясно е че $T(n) \asymp 2^n$. Като използваме метода на характеристичното уравнение, не е нужно да намираме накрая константите за да разберем каква е асимптотиката. Достатъчно е да вземем събираемостта, която расте най-много (в случая 2^n).

Нека сега разгледаме и последният начин:

Теорема (Master теоремата). Нека $a \geq 1$, $b > 1$ и $f \in \mathcal{F}$. Нека $T(n) = aT(\frac{n}{b}) + f(n)$ (мислете си, че $T(0) = 1$), където $\frac{n}{b}$ се интерпретира като $\lfloor \frac{n}{b} \rfloor$ или $\lceil \frac{n}{b} \rceil$. Тогава:

1 сл. Ако $f(n) \preceq n^{\log_b(a) - \varepsilon}$ за някое $\varepsilon > 0$, то тогава $T(n) \asymp n^{\log_b(a)}$

2 сл. Ако $f(n) \asymp n^{\log_b(a)}$, то тогава $T(n) \asymp n^{\log_b(a)} \log(n)$

3 сл. Ако са изпълнени следните условия:

1. $f(n) \succeq n^{\log_b(a) + \varepsilon}$ за някое $\varepsilon > 0$

2. съществува $0 < c < 1$, за което от някъде нататък $a \cdot f(\frac{n}{b}) \leq c \cdot f(n)$,

то тогава $T(n) \asymp f(n)$

Нека разгледаме рекурентното уравнение:

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + 1$$

Тук $a = b = 2$, и $f(n) = 1$. Също така $\log_b(a) = 1$, откъдето $f(n) = 1 \preceq n^{\log_b(a) - \varepsilon}$, за $\varepsilon \in (0, 1)$. Така по 2 сл. на Master теоремата получаваме, че $T(n) \asymp n$.

Задачи

Задача 1. Без да се използва Master теоремата да се намери асимптотиката на сложността по време на алгоритъма Merge sort т.е. на рекурентното уравнение:

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n$$

Задача 2. Да се намери асимптотиката на следните рекурентни уравнения:

$$T_1(n) = 29T_1\left(\frac{n}{3}\right) + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2} \quad T_2(n) = 29T_2\left(\frac{n}{3}\right) + 12n + \sqrt{n} \quad T_3(n) = T_3(n-1) + \frac{n}{(n+1)(n-1)}$$

$$T_4(n) = 29T_4\left(\frac{n}{3}\right) + \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i}\right)^4 \quad T_5(n) = 29T_5\left(\frac{n}{3}\right) + 2 \sum_{i=1}^n i^2 \quad T_6(n) = 29T_6\left(\frac{n}{3}\right) + n^{\sqrt{n}} + (\sqrt{n})^n$$

$$T_7(n) = T_7(\sqrt{n}) + n \quad T_8(n) = 29T_8\left(\frac{n}{3}\right) + \binom{2n}{2} \quad T_9(n) = 8T_9(n-1) - T_9(n-2) + 2n2^{2n} + 3n2^{3n}$$

Задача 3. Да се намери сложността по-време на следният алгоритъм:

```
1  int alg(int n)
2  {
3      if (n < 2)
4          return 2;
5
6      int t = 0;
7      t += alg(n / 3);
8
9      for (int i = 2; i < n; i *= 2)
10     {
11         t++;
12     }
13
14     t *= alg(n / 3);
15
16     return t;
17 }
```